

# 海底隧道数字孪生系统的研究与应用

朱鑫

(中交一航局安装工程有限公司)

**摘要:**为了解决大连湾海底隧道的运营管理和交通安全问题,对海底隧道数字孪生系统建设进行深入研究,该系统融合了虚拟仿真、物联网、大数据分析以及 UE4 游戏引擎等先进技术。在研究过程中设计了数字孪生系统软硬件系统架构,并利用 BIM 模型、UE4 技术和物联网进行海底隧道三维模型建立和隧道实时数据挂接,从而实现通过数字孪生系统直观的展示对隧道运行状况的全面监测和预测分析。结果表明,该数字孪生系统能有效地提高隧道运营管理的安全性和通行效率。数字孪生系统作为一种新兴的技术手段,对于提升海底隧道的科学管理和交通安全具有重要的应用价值。

**关键词:**海底隧道;数字孪生;UE4;物联网;大数据

## 0 引言

在现代城市交通体系中,海底隧道作为连接两岸的关键枢纽,凭借其独特的地理优势,有效缓解了陆地交通压力,极大地促进了区域间的交流与发展。然而,海底隧道因其特殊的地理环境、复杂的工程结构以及繁重的通行需求,在运营管理和交通安全保障方面面临着诸多严峻挑战。传统的管理模式在应对这些复杂问题时逐渐显得力不从心,如何实现对海底隧道的高效、智能、精准管理,已成为亟待解决的重要课题。

数字孪生(Digital Twin)作为一种在信息世界刻画物理世界、仿真物理世界、优化物理世界、可视化物理世界的重要技术,为实现数字化转型、智能化(如智慧交通、智能制造)、服务化、绿色可持续等全球工业和社会发展趋势提供了有效途径。当前,数字孪生技术被工业界和学术界广泛关注和研究<sup>[1]</sup>。

目前,国内外关于数字孪生技术在隧道运维管理中的研究尚处于起步阶段。国外一些研究机构和企业已经开始尝试将数字孪生技术应用于隧道管理,取得了一定的成果。国内在这方面的研究也逐步展开,但整体上仍处于探索阶段。现有研究多集中在数字孪生系统的构建原理和方法上,对其在运维管理中的具体应用和效果评估方面的研究相对较少。

本文以大连湾海底隧道为研究对象,深入探讨数字孪生系统在隧道运维管理中的应用。主要

研究内容包括:数字孪生系统的软硬件架构设计、与传统运维管理模式的对比分析、数字化孪生建模过程中的技术重点、难点等。本文的创新点主要体现在以下 3 个方面:

1) 提出了一种适用于海底隧道的数字孪生系统架构,实现了对隧道内部环境和设备的全面监控和管理。

2) 通过与传统运维管理模式的对比分析,揭示了数字孪生系统在提高隧道运营安全性和效率方面的优势。

3) 针对数字化孪生建模过程中的技术重点、难点进行了深入探讨,提出了相应的解决方案。

## 1 工程概况

大连湾海底隧道建设工程全长 5.1 km,隧道为双向六车道,设计时速 60 km/h,主体结构使用寿命 100 a。沉管隧道长度 3 km,隧道沉管段由 13 节直线管节和 5 节曲线管节组成,管节采用两孔一管廊的结构形式,标准管节长 180 m,断面尺寸为宽 33.4 m、高 9.7 m,重 6 万 t。北岸工程包含直立式围堰、止水结构、止推段、暗埋段及敞开段主体结构;南岸工程包括斜坡式临时围堰、围护与止水结构、暗埋段及敞开段主体结构。南北岸主体结构为现浇工艺,暗埋段为两孔一管廊的结构形式,敞开段为 U 形槽结构形式。

## 2 数字孪生系统总体设计

大连湾海底隧道作为大连城市交通系统的重要组成部分,扮演着横跨大连 C 字形港池连

接南北两岸的关键角色。然而，大连湾海底隧道的独特地理环境和复杂交通状况使得其管理和安全成为一项重要的挑战。

以大连湾海底隧道数字孪生系统建设为例，依托大连湾海底隧道数字化工程建设实际需求提出系统建设思路及总体框架。系统将实现物联网技术与三维可视化技术的交叉融合，既满足公众出行服务，又满足隧道运营单位管理需求，同时实现海底隧道全生命周期数字化管理及信息传递，助力海底隧道智能化运营运维<sup>[9]</sup>。

## 2.1 数字孪生系统需求

数字孪生系统在海底隧道运维管理中的需求主要体现在以下4个方面：

1) 实时监控与数据采集：实时采集隧道内部的环境数据(如温度、湿度、烟雾等)和设备状态数据(如照明、通风、监控设备等)，以便及时发现异常情况并进行处理。

2) 数据分析与预测：通过对采集到的数据进行分析，预测隧道内部的环境变化趋势和设备故障风险，为运维决策提供科学依据。

3) 可视化展示与交互：将隧道内部的实时数据和预测结果以直观的方式展示给运维人员，方便了解隧道的运行状况并进行相应的操作。

4) 应急响应与故障处理：在发生突发事件或设备故障时，能够迅速启动应急预案，指导运维人员快速响应和排除故障。

## 2.2 硬件系统构架

数字孪生系统的硬件架构是支撑系统运行和数据处理的重要基础。本文研究构建的数字孪生系统硬件架构涵盖了从数据采集到可视化呈现的完整链条，包括：

1) 数据采集与传感器层：负责收集隧道内部的各种数据，包括交通流量、CO/VI、风速风向、亮度、事件、交通情况等数据。传感器分布在隧道各个位置，通过光纤传输方式将数据传输到项目数据中心。

2) 数据处理与存储层：收集到的原始数据需要进行处理和存储。本项目利用高性能的超融合服务器和关系型数据库系统，用于对大量数据进行存储、管理和分析。数据处理可以包括数据清洗、预处理、特征提取等步骤。

3) 模型构建与仿真层：利用BIM技术建立隧道的数字孪生模型，包括物理结构、交通流动

模型、环境模型等。这些模型可以基于数学建模和倾斜摄影仿真技术创建，以反映真实隧道的运行情况。

4) 数据集成与实时监测层：将从数据采集层获得的实时数据与数字孪生模型进行挂接集成。这样可以实时将隧道实际运行情况和设备实时工作状态映射到数字孪生模型中，实现对隧道内部状态的实时监测。

5) 预测与分析层：利用历史数据和实时监测数据，进行交通流量预测、事故风险分析、环境变化预测、设备运行趋势分析等。这些分析可以帮助管理人员做出决策，优化交通管理、设备维护和应急响应。

6) 可视化与用户界面层：通过精细、流畅的数字孪生用户界面，可以实时查看隧道内部的运行状态、数据分析结果和预测信息。可视化界面可以是图表、地图、虚拟现实等形式，能够更加直观地理解和操作系统。

数字孪生系统的硬件架构需要综合考虑数据采集、处理、存储、分析、可视化等多个环节，以实现隧道运行状况的全面监测和预测分析。

## 2.3 数字孪生软件架构

海底隧道数字孪生系统是以BIM模型为设计主体，采用UE4技术，对隧道进行建模，包含行车道、设备用房、机电设备、土建设施等。在三维空间中用把事件、隧道监测设备、视频、风机、车道指示灯、设施等各类不同的数据清晰地展示出来，便于查看。可分类监控、查询，通过对构件的选择，显示不同的层级内容在三维模型上。

软件框架共分为4层：

1) 三维层：为各种三维数据信息的储存，包含了BIM数据，GIS数据等。

2) 数据层：为系统基础数据处理层，通过modbus、TCP/IP等协议获取设备实时数据，通过数据库中间件获取设备历史数据，为数字孪生系统应用提供数据支撑。

3) 服务层：为系统数据更新服务、模型实时渲染服务和单点登录服务，通过建立这些服务，提高系统运行的可靠性、安全性和实时性。

4) 应用层：基于UE4引擎平台将三维模型和实时数据相结合，直观地为管理分析决策提供依据。

软件整体设计框架见图1。

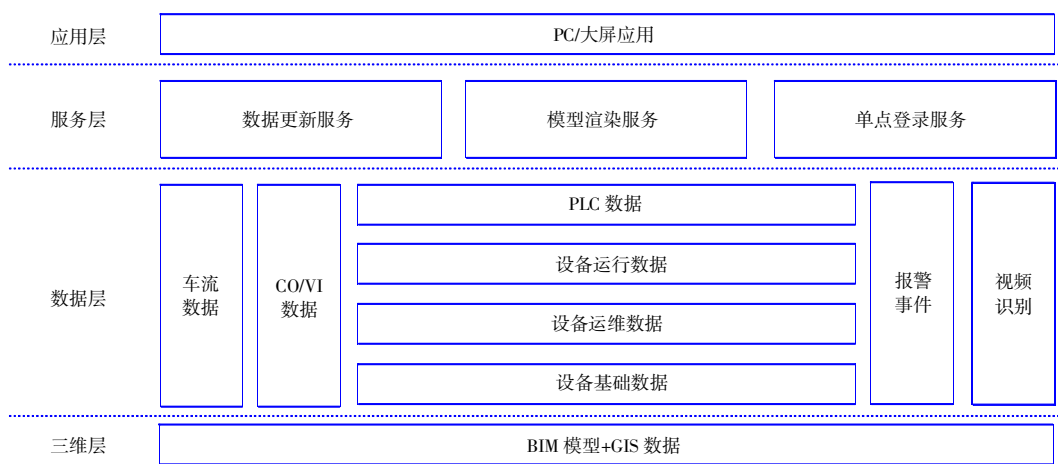


图 1 软件设计框架图

### 3 数字孪生系统与传统运维管理对比

传统运维管理主要依赖于人工巡检和定期维护等方式，对隧道的内部环境和设备进行监控和管理。这种方式存在以下不足：

- 1) 信息获取不及时：人工巡检的时间间隔较长，难以实时掌握隧道的内部环境和设备状态。
- 2) 数据分析能力有限：传统运维管理缺乏有效的数据分析手段，难以从海量数据中提取有价值的信息。
- 3) 应急响应能力不足：在发生突发事件或设备故障时，传统运维管理难以迅速启动应急预案，指导运维人员进行快速响应和故障排除。

相较于传统运维管理方式，数字孪生系统在隧道运维管理中具有以下优势：

- 1) 实时监测：数字孪生系统可以实现对隧道内部环境和设备的实时监测，及时发现异常情况并进行处理。
- 2) 智能决策：通过对采集到的数据进行分析 and 预测，数字孪生系统可以为运维决策提供科学依据，提高运维管理的智能化水平。
- 3) 直观可视：数字孪生系统可以将隧道内部的实时数据和预测结果以直观的方式展示给运维人员，方便他们了解隧道的运行状况并进行相应的操作。
- 4) 高效应急：在发生突发事件或设备故障时，数字孪生系统能够迅速启动应急预案，指导运维人员进行快速响应和故障排除。

## 4 数字孪生建模技术

### 4.1 数字孪生建模技术概述

数字孪生建模技术是一种基于物理实体的虚

拟映射技术，通过构建数字孪生模型，实现对物理实体的全面监控和管理。在隧道运维管理领域，数字孪生建模技术可以实现对隧道内部环境和设备的实时监测、数据分析和预测等，为运维决策提供科学依据。

### 4.2 建模过程中的技术重点

数字孪生建模过程中的技术重点主要包括以下 5 个方面：

- 1) 数据采集与传输：如何实时、准确地采集隧道内部的环境和设备数据，并将其高效地传输至数据中心，是建模过程中的首要任务。
- 2) 数据处理与分析：对采集到的数据进行清洗、预处理和特征提取等操作，以便为后续分析和建模提供可靠的数据基础。
- 3) 模型构建与仿真：利用 BIM 技术和倾斜摄影仿真技术，建立隧道的数字孪生模型，包括物理结构、交通流动模型和环境模型等。这些模型需要能够准确反映真实隧道的运行情况。
- 4) 数据集成与实时监测：将从数据采集层获得的实时数据与数字孪生模型进行挂接集成，实现对隧道内部状态的实时监测。
- 5) 预测与分析：利用历史数据和实时监测数据，进行交通流量预测、事故风险分析、环境变化预测等，帮助管理人员做出决策并优化交通管理和设备维护。

### 4.3 建模过程中的技术难题及解决方案

数字孪生建模过程中的技术难题及解决方案主要包括以下 5 个方面：

- 1) 数据采集难题：由于隧道内部环境复杂且设备众多，如何部署足够的传感器以覆盖所有关

键区域并实时采集数据是一个挑战。解决方案是在关键区域部署高密度传感器网络，并采用先进的数据传输技术确保数据的实时性和准确性。通过与隧道各类监控软件对接，获取实时设备状态数据、运行数据及监测数据<sup>[9]</sup>。

2) 数据处理难题：隧道内部产生的数据量巨大且类型多样，如何高效处理这些数据是一个难题。解决方案是采用高性能计算平台和大数据处理技术，对数据进行快速处理和分析。

3) 模型构建难题：隧道的数字孪生模型需要具备高度的真实性和准确性，这要求建模过程中需充分考虑各种因素并采用先进的建模技术。解决方案是结合 BIM 技术和倾斜摄影仿真技术，构建精细的三维模型，并通过实际数据进行校准和优化。

4) 实时监测难题：如何确保数字孪生模型与实际隧道的内部环境和设备状态保持一致是一个挑战。解决方案是建立完善的数据更新机制，定期将实际数据与模型进行对比和更新。

5) 预测与分析难题：隧道的内部环境和设备状态受多种因素影响，如何进行准确的预测和分析是一个难题。解决方案是采用机器学习和人工智能技术，对历史数据进行学习和挖掘，提高预测和分析的准确性。

## 5 工程应用

### 5.1 应用场景与流程

在大连湾海底隧道的实际运营中，数字孪生系统在多个关键场景发挥着重要作用。在隧道日常运营中，系统不间断地实时采集各类数据（环境数据、设备状态数据等），通过光纤环网快速传输至数据中心。在数据处理与存储层，超融合服务器和关系型数据库系统对数据进行快速清洗、存储和初步分析。

同时，基于 BIM 技术和倾斜摄影仿真技术构建的数字孪生模型，实时接收来自数据采集层的信息，实现对隧道内状况的精准映射。在可视化与用户界面层，通过 PC 端或大屏应用，能直观地观察到隧道的实时运行状态，包括交通流量分布、设备工作状态是否正常等。

一旦系统监测到异常情况，如某区域温度异常升高、设备故障报警或突发交通事故，会迅速触发应急响应机制。系统自动定位异常位置，并在三维可视化界面中突出显示，同时弹出详细的

异常信息，包括异常类型、可能原因等。依据系统提供的信息，快速启动相应的应急预案，采取针对性措施进行处理。

### 5.2 应用效果

#### 1) 提高运营安全性

数字孪生系统的实时监测功能大大提升了大连湾海底隧道的运营安全性。在应用该系统之前，由于人工巡检存在时间间隔，部分设备隐患难以及时发现，导致小故障发展成大问题，甚至可能引发安全事故。而应用数字孪生系统后，能对设备进行 7×24 h 不间断监测，设备故障预警时间平均提前了 3~5 h，可以在故障发生前进行预防性维护，大大降低了因设备故障引发的安全风险。

此外，系统的环境监测功能也发挥了重要作用。通过实时采集隧道内的温度、湿度、烟雾等数据，能够及时发现火灾隐患。自系统投入使用以来，成功预警并避免了多起可能的火灾事故，确保了隧道内人员和车辆的安全。

#### 2) 提升通行效率

借助数字孪生系统的交通流量预测和分析功能，运营管理部门能够提前制定合理的交通疏导策略。例如，在早晚高峰时段，系统根据历史数据和实时监测信息，准确预测出可能拥堵的路段和时间，管理部门提前通过可变信息板发布交通诱导信息，引导车辆选择更顺畅的行驶路线，使得隧道内的平均车速提升了 15%，拥堵时长减少了 20%，显著提高了隧道的通行效率。

#### 3) 降低运维成本

传统的运维管理方式依赖大量人工巡检和定期维护，人力和物力成本较高。数字孪生系统的应用改变了这一状况，通过对设备运行状态的实时监测和故障预测分析，实现了从定期维护向基于状态的维护转变。这使得设备维护更加精准和高效，减少了不必要的维护工作，运维成本降低了 10%。

## 6 结语

本文以大连湾海底隧道为研究对象，通过设计一种适用于海底隧道的数字孪生系统架构，实现了对隧道内部环境和设备的全面监控与管理。该研究不仅通过与传统运维管理模式的对比，突显了数字孪生系统在提升隧道运营安全性和效率方面的显著优势，还深入探讨了数字孪生建模过程中遇到的技术难点，并提出了有效的解决方案，

不仅为大连湾海底隧道的运维管理提供了坚实的技术支撑,同时也为其他相似工程项目提供了宝贵的参考经验,展示了数字孪生技术在未来基础设施运维管理领域的广阔应用前景。

本研究在隧道内部环境监测与运维管理方面取得了显著进展,包括优化了传感器网络布局、应用了高性能计算平台和大数据处理技术、结合 BIM 技术和倾斜摄影构建了精细的三维模型、建立了初步的实时监测体系以及利用机器学习和人工智能技术进行了预测分析等,但仍然面临着一系列挑战。主要表现在数据采集的全面性和实时性不足、数据处理效率有待提升、三维模型的真实性和准确性需要进一步增强、数字孪生模型与

实际环境的同步性不够理想、以及预测分析的不确定性和可靠性不足。针对这些问题,未来的改进方向将集中在优化传感器网络和数据传输技术、探索更高效率的数据处理方法、引入更多实际数据和先进建模技术以优化模型构建、建立更加完善的数据更新机制以及开发更为精准的预测算法和分析模型等方面。

#### 参考文献:

- [1] 陈志涛,陆艳铭,李朋. 高速公路隧道数字孪生体系构建研究[J]. 交通科技与管理,2023,4(3):1-3,52.
- [2] 张喻. 多维度感知技术在隧道数字孪生管理平台中的应用[J]. 中国交通信息化,2023(11):90-91,100.
- [3] 杨巍,卢士军,王伟珍,等. 基于数字孪生的隧道监管平台探究[J]. 中国交通信息化,2022(11):140-143.

(上接第 39 页)

优化混凝土配合比+温控设计、连续式膨胀加强带+后浇式膨胀加强带组合的多形式膨胀加强带等关键技术,有效解决了本项目施工中的问题,具有较高的推广应用价值,可为类似的地下式水厂项目施工提供借鉴。但本文叙述的关键技术仍有一定局限性,不能完全适应全部自来水水厂工程,需要选择性使用,并且需要针对不同的工程、不同的条件配合不同的技术,才能解决不同的工程

问题。

#### 参考文献:

- [1] 武亚军,栾茂田,任汉锋. 深基坑支护设计增量法的理论分析及其应用[J]. 工业建筑,2004,34(9):1-4.
- [2] 张海峰,苗春. 粉煤灰和矿粉双掺技术在大体积混凝土工程中的应用[J]. 粉煤灰,2008,20(5):21-23.
- [3] 张宇鑫. 大体积混凝土温度应力仿真分析与反分析[D]. 大连:大连理工大学,2002.
- [4] 魏一豪. 超长混凝土结构无缝设计关键技术研究及应用[D]. 南京:东南大学,2017.

(上接第 48 页)

后续研究中仍需进一步拓展其范围,深入探究修复材料的性能优化,致力于工艺的智能化发展。同时,加大对实际工程修复效果和使用寿命的跟踪与评估力度,构建更为完备的标准化工艺技术,以此有力地推动非开挖修复工艺技术在城市排水领域广泛应用,并促进其可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 李春雷,石叶,胡荣华. 局部树脂固化技术在大口径高水头排水管道修复中的应用[J]. 智能城市,2021(1):117-118.
- [2] 唐伟超. CIPP 非开挖地下管道原位加固施工技术研究[J]. 建筑科技,2023(1):28-29.
- [3] 庄奇翼. 非开挖技术在排水管道修复中的应用[J]. 散装水泥,2024(1):66-68.